

IPを使用したX線応力測定法による 鉄道レールの表面残留応力測定

佐々木 敏彦・兼松 義一*

Residual Stress Measurement of Railway Rail by X-ray Stress Measurement Using IP

Toshihiko SASAKI and Yoshikazu KANEMATSU

1 緒言

鉄道で使用されているレールには列車車輪との接触によって徐々に経時的ダメージ（転がり接触疲労）が蓄積され、き裂発生や折損に繋がる恐れがある。このため、定期的なレール交換や折損予防を目的とした表面ダメージ層の削正などの処理が必要となっている。レールの敷設距離は膨大であり、効率的に各部の状況进行评估することは困難を伴うため、削正や交換がほぼ一律に実施されている。しかし、レールの損傷状況やダメージの進行状況はレールの場所ごとに種々異なっているはずであり、一定ではないと考えられる。

以上を踏まえ、レールの劣化状況や余寿命の評価を正確に把握する方法を開発することは、健全性の確認、損傷箇所の特定、削正時期の正確な決定等に寄与し、必要箇所のみを補修交換することができ、経済面や作業効率および安全性の観点からも有効となる。このためのレールの強度評価方法には磁気、超音波、X線回折を利用した方法など種々の方法があるが、本研究では検出器にイメージングプレート（IP）を用いた新方式のX線応力測定法について検討した。

本報告では、基礎実験として、IPと応力解析理論である $\cos\alpha$ 法による応力測定の検証を四点曲げ負荷を通して行った。次にレール頭頂面の残留応力分布について検討した。

2 測定理論

Fig.1のように試料とIPの座標系を定義し、入射X線ビームを試料の法線方向から ϕ_0 だけ傾斜して入射させ、これによって材料から発生する回折環を入射ビームと垂直に配置したIP上に撮影する場合について考える。多相材料の場合、試料表面と垂直な方向の応力成分を無視できないため、測定される応力値は次式のように $(\sigma_x - \sigma_z)$ の形で表す。

$$\sigma_x - \sigma_z = \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left[-\left(\frac{2}{S_2} \right) \frac{1}{\sin 2\eta} \left(\frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha} \right) - 2\tau_{xz} \cos 2\psi_0 \right] \quad (1)$$

ここで、 η はBragg θ の余角（ $\eta = \pi/2 - \theta$ ）、 s_2 はX線弾性定数（ $s_2 = 2(1+\nu)/E$ ）、 α は回折環中心角を表す。またFig.2に示すように a_1 は回折環の中心角がそれぞれ α 、 $-\alpha$ 、 $\pi + \alpha$ 、 $\pi - \alpha$ であるような回折ビームから得られるX線的ひずみ ϵ_α 、 $\epsilon_{-\alpha}$ 、 $\epsilon_{\pi+\alpha}$ 、 $\epsilon_{\pi-\alpha}$ から導かれるパラメータであり、次式で与えられる。

$$a_1 \equiv \frac{1}{2} [(\epsilon_\alpha - \epsilon_{\pi+\alpha}) + (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{\pi-\alpha})] \quad (2)$$

ここで、 $\tau_{xz} = 0$ とみなすと式(1)より次式が得られる。

$$\sigma_x - \sigma_z = -\left(\frac{2}{s_2} \right) \frac{1}{\sin 2\psi_0} \frac{1}{\sin 2\eta} \left(\frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha} \right) \quad (3)$$

式(3)を利用すると、一個の回折環全体のX線的

ひずみから a_1 対 $\cos \alpha$ 関係を求め、その直線の傾きを得ることにより、応力($\sigma_x - \sigma_z$)が決定できることになる。

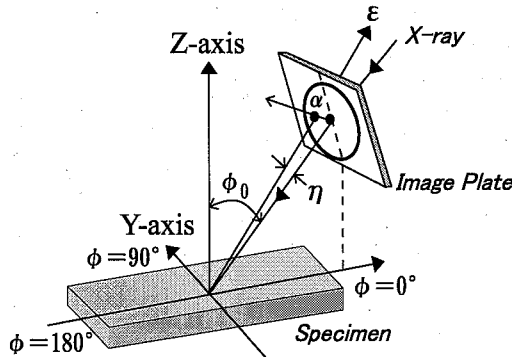


Fig.1 IP/cos α 法の原理図

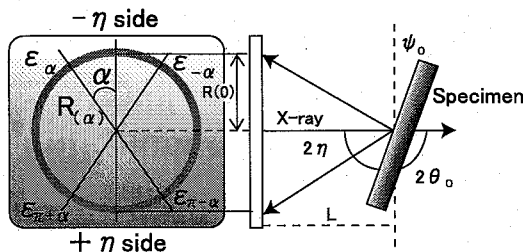


Fig.2 回折環からの4方向のひずみの測定位置

3 試験片

現在、日本で使われている鉄道用レールと多数のその付属品の規格は、日本工業規格(JIS-E 1101普通レール及び分岐器類用特殊レール)にて形状や成分が定められている。鉄道レールの化学成分および機械的性質をTable 1に示す。本研究では、試験片として、未使用レール(NEW)と一定期間使用したレールから取り出したもの(USED)を使用した。この試料の累積通過トン数は174MGT (MGT: 車軸軸重×通過軸数)である。NEWレールはUSEDレールとの比較用として準備した。USEDレールの頭頂面におけるレール幅方向のVickers硬さ試験結果をFig.3に示す。

3.1. 負荷実験用試料

レール頭頂部からレールの幅方向を試験片長手方向としてフライス盤、ファインカッター、平面研削で切り出し、加工の影響を取り除くため、測定面を約 $100 \mu\text{m}$ ずつ電解研磨を行い、Fig.4に示す形状とした(L60mm×W10mm×H5mm)。測定面の背面にひずみゲージを接着し、四点曲げジグにより負荷を与えた。このようにして、本IPX線応力測定とひずみゲージからの各応力を比較し、同時に本試料のX線の弾性定数に関して検討した。

3.2. USEDレール

鉄道レール頭頂部の損傷状態を調べるために、レール頭頂部のみを切削し、さらにワイヤー放電加工機によってFig.5(a)に示す形状とした。X線測定点はレール幅方向に計9点であり、各々は5mm間隔とした(Fig.5参照)。Fig.6に表面付近の組織写真を示すが、このようにレール頭頂部には塑性フローが見られたため、三軸応力の影響を考慮してX線入射方向 ϕ_0 をレール長手方向($\phi_0=0^\circ$ および $\phi_0=180^\circ$)、幅方向($\phi_0=90^\circ$)の測定を行った。

Table 1 鉄道レールの化学成分

化学成分 %					引張強さ N/mm^2
C	Si	Mn	P	S	
0.63~0.75	0.15~0.30	0.70~1.10	0.030 以下	0.025 以下	800 以上

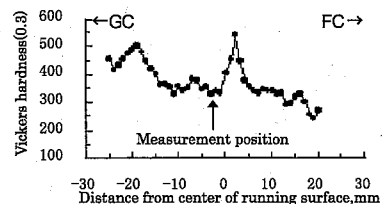


Fig.3 レール幅方向に関するVickers硬さ試験結果

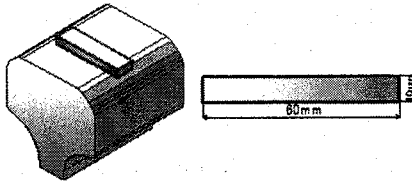


Fig.4 四点曲げ用試験片

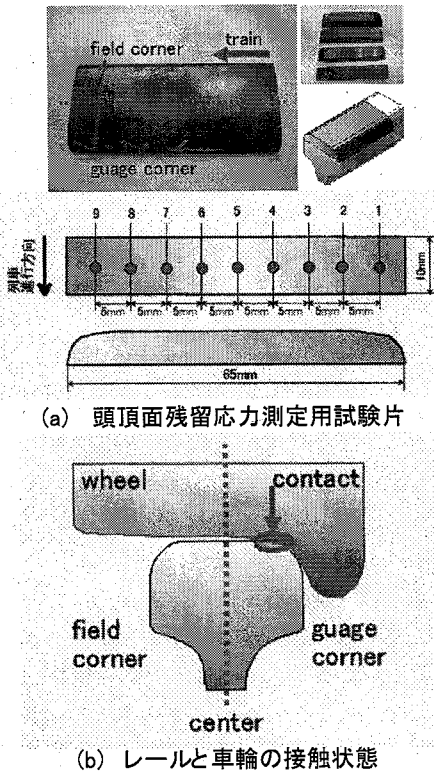


Fig.5 レールと車輪の接触状態のモデル図およびゲージコーナー(GC)、フィールドコーナー(FC)の定義

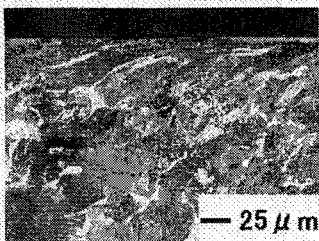


Fig.6 レール頭頂面の顕微鏡観察結果 (USEDレールのゲージコーナー付近)

4 測定方法

本実験のX線測定条件はCr-K α 線を管電圧40kV、管電流200mAで用いた。コリメータ径は1mmを使用した。X線の入射角は $\phi_0=30\text{deg}$ であった。表2に実験条件を示す。IP(127mm \times 127mm)をX線カメラにセットしX線測定された後、市販されている読み取りシステム(BAS-2500)を使用し、回折像のデジタルデータをコンピュータに保存した。この読み取りシステムはIPをドラムに乗せ、読み取り期間中回転するタイプのものである。読み取り過程における空間分解能は100ミクロンであり、回折像は1150 \times 1140ピクセルから構成されている。Fig.7は実験装置の写真である。

Table 2. X線応力測定条件

Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction line ,hkl	α 211
Tube voltage ,kV	40
Tube current ,mA	200
Collimator ϕ ,mm	1
Incident angle ϕ_0 ,deg	Specimen 30 Fe-Powder 0
Camera length ,mm	Specimen 80 Fe-Powder 50



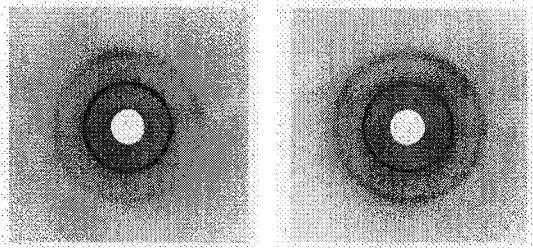
Fig.7 実験光学系

5 実験結果と考察

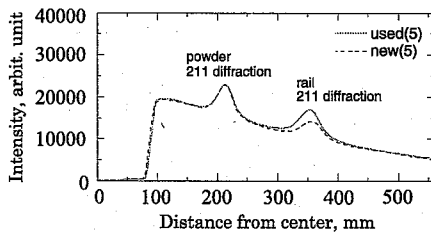
5.1. IP回折環像

Fig.8にレール頭頂面から得られた回折像を示す。二個の回折環の内の外側がレールからのものであり、内側の小さいリングは画像解析用の基準のために二重撮影したFe粉末の回折である。このときのカメラ長(IP-粉末間距離)はレール測定時の約1/2として撮影した。Fig.8(c)に回折

環半径方向の回折強度分布を示す。USEDではレールからの回折ピーク(同図の右側ピーク)に半価幅の増加が見られるが、応力測定に影響するほどの変化ではない。NEWレールのピーク強度の低下が見られるが、その原因は頭頂面全体を覆っていた錆によるX線の吸収である。今回の測定では最表面のデータを得るため、表面の錆を除去せずにX線測定を行った。



(a)使用済みレール (USED) (b)未使用レール(NEW)



(c) 回折環中心から半径方向への回折強度分布

Fig.8 鉄道レールの回折環像
(Cr-K α 線による α Fe211回折)

5.2. 四点曲げ負荷実験

Fig.9に、使用済みレール(USED)から採取した四点曲げ試験片に対して、IP搭載型X線応力測定装置によって $\cos \alpha$ 法による応力測定結果を負荷応力と比較した結果を示す。図のように、ほぼ一対一の対応関係が得られており、本方法により応力測定が基本的に可能であることが確認できる。なお、応力定数に鉄鋼用の標準値を用いると、数%程度測定応力が低く評価される傾向が見られた。本材料は炭素含有量が多いため、弾性定数が大きいセメントイトや炭化物が存在しており、これらの構成相において微視的

応力の平衡に伴う相応力の影響が予想できる。この場合、弾性係数が低いフェライト相はマクロ応力(負荷応力)より低い値を持つと考えられるので、測定結果と傾向が一致する。同様の測定をNEWレールに対しても実施した結果、USEDとほぼ同様な傾向が見られた。

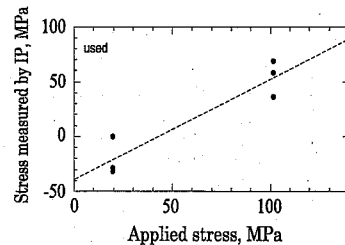


Fig.9 四点曲げ負荷測定結果

5.3. 残留応力

Fig.10にUSEDレールの頭頂面から測定された残留応力の結果を示す。測定応力成分は、レール幅方向の垂直応力である。二種類のデータはレール面を削正処理したもの(rail(G))、および、削正していないもの(rail(N))を表している。測定結果には、削正処理の有無の相違が現れていることと、レール頭頂面のセンタを境に左右での分布に違いがあることも分かる。これは、列車の車輪踏面における勾配に伴うすべりの発生の相違と関係することが考えられる。すなわち、レールの頭頂面では、列車進行方向と平行かつ頭頂面と垂直な断面において観察される塑性フロー(Fig.6参照)は、レール頭頂面の中心を境にして列車進行方向に対して左右逆の方向にフローしている。また、列車側の車輪の踏面は外径が一定ではなく、ゲージコーナー(GC)からフィールドコーナー(FC)にかけて減少している。したがって、レール頭頂面には複雑な応力が作用していることが考えられる。Fig.11は、このようなレール断面の塑性フローによる三軸応力状態の発生点を考慮し、X線入射角 ϕ_0 をFig.10の場合と 180° 変えた方向の測定を行った結果を示している。その結果、削正処理試料(G)ではGC側半分には引張り応力分布が見られ、非削正試料(N)では

やや圧縮応力側に低下している。また、残留応力はレール中央を境にしてGC、FC側に傾向的に異なった分布を呈している。ただし、削正試料のGC側以外の残留応力レベルは総じて小さい値である。一方、X線入射角 ϕ_0 の正負による違いが小さいことがFig.11から分かる。その原因の一つは、応力計算において $\cos \alpha$ 法を適用したため、得られた応力が垂直応力の差 $\sigma_x - \sigma_z$ であることも一因と考えられる。今後、各三軸応力成分を分離して求めて検討することも必要と思われる。なお、Fig.10およびFig.11と直角方向の垂直応力成分の測定も同時に行ったが、その結果からも大きさおよび分布のいずれもFig.10およびFig.11と同様な残留応力分布傾向が観察された。レール素材は高炭素鋼のため、半価幅の増大がX

のみの測定であったが、文献に依れば在来線レールでは、レール頭頂面から約0.5mm程度の内部に最も強い111集合組織が観察されるとの報告があり、このような内部のX線観察も今後の課題である。

6 結論

X線応力測定法は、鉄道レールの材料強度評価のために有望な技術の一つであり、今後、レールのメンテナンスやダメージ箇所の検出等、鉄道の安全や営業コストの削減に寄与できる可能性がある。そのためには、X線応力測定法による基礎実験を積み重ね、さまざまな条件下のレールに対して検討することが必要となると思われる。

7 参考文献

参考文献

- 1) 柏谷賢治, 井上靖雄, 佐藤幸雄, 材料, 49-7, pp.837(2000)
- 2) 柏谷賢治, 井上靖雄, 佐藤幸雄, Railway Research Review, 1991-9, pp.27-32(1991)
- 3) 塙光雄, 日本鉄道施設協会誌, 36-5, pp.323-325 (1998)
- 4) 佐藤幸雄, 岩淵研吾, 他5名, 材料研究連合予稿集(平成15年11月)
- 5) 阿部司, 他6名, 材料研究連合予稿集(平成15年11月)

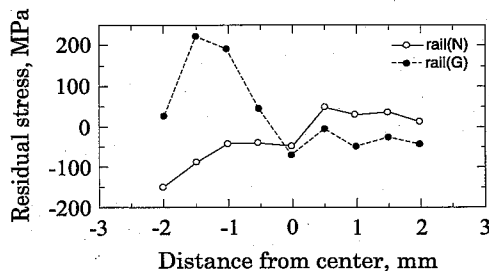


Fig.10 レール頭頂面における残留応力分布
(レール幅方向の垂直応力, 横軸負方向がC側)

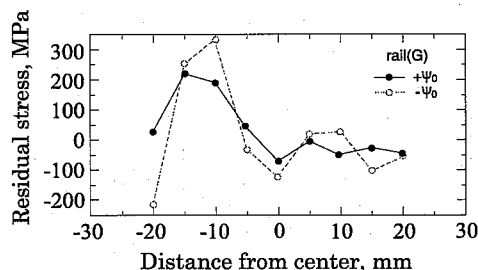


Fig.11 レール頭頂面における残留応力
(レール幅方向の垂直応力, 横軸負方向C)

線応力測定の障害になる点が懸念されたが、未使用材はもとより累積トン数174MGT程度でも問題なく応力測定可能であることなどが確認できた。ここでは、X線測定の制約上、レール頭頂面